

Document made available under the Patent Cooperation Treaty (PCT)

International application number: PCT/FR05/000135

International filing date: 21 January 2005 (21.01.2005)

Document type: Certified copy of priority document

Document details: Country/Office: FR
Number: 0400580
Filing date: 22 January 2004 (22.01.2004)

Date of receipt at the International Bureau: 01 April 2005 (01.04.2005)

Remark: Priority document submitted or transmitted to the International Bureau in compliance with Rule 17.1(a) or (b)



World Intellectual Property Organization (WIPO) - Geneva, Switzerland
Organisation Mondiale de la Propriété Intellectuelle (OMPI) - Genève, Suisse



PCT/FR 20 05 / 0 0 0 1 3 5

BREVET D'INVENTION

CERTIFICAT D'UTILITÉ - CERTIFICAT D'ADDITION

COPIE OFFICIELLE

Le Directeur général de l'Institut national de la propriété industrielle certifie que le document ci-annexé est la copie certifiée conforme d'une demande de titre de propriété industrielle déposée à l'Institut.

Fait à Paris, le 24 JAN. 2005

Pour le Directeur général de l'Institut
national de la propriété industrielle
Le Chef du Département des brevets

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'M. Planche', enclosed within a large, stylized oval loop.

Martine PLANCHE

INSTITUT
NATIONAL DE
LA PROPRIÉTÉ
INDUSTRIELLE

SIEGE
26 bis, rue de Saint-Petersbourg
75800 PARIS cedex 08
Téléphone : 33 (0)1 53 04 53 04
Télécopie : 33 (0)1 53 04 45 23
www.inpi.fr

UNION EUROPÉENNE



26 bis, rue de Saint Pétersbourg
75800 Paris Cedex 08
Téléphone : 33 (1) 53 04 53 04 Télécopie : 33 (1) 42 94 86 54

BREVET D'INVENTION CERTIFICAT D'UTILITÉ

Code de la propriété intellectuelle - Livre VI



N° 11354*03

REQUÊTE EN DÉLIVRANCE page 1/2

BR1

Cet imprimé est à remplir lisiblement à l'encre noire

DB 540 e / 210502

REMISE DES PIÈCES DATE 22 JAN 2004 LIEU 75 INPI PARIS 34 SP N° D'ENREGISTREMENT 0400580 NATIONAL ATTRIBUÉ PAR L'INPI DATE DE DÉPÔT ATTRIBUÉE PAR L'INPI 22 JAN. 2004		2 NOM ET ADRESSE DU DEMANDEUR OU DU MANDATAIRE À QUI LA CORRESPONDANCE DOIT ÊTRE ADRESSÉE PONTET ALLANO & Associés Selarl 25 rue Jean Rostand Parc Club Orsay Université 91893 ORSAY Cedex	
Vos références pour ce dossier (facultatif) IFBS04 CNR MES			
Confirmation d'un dépôt par télécopie <input type="checkbox"/> N° attribué par l'INPI à la télécopie		3 NATURE DE LA DEMANDE Cochez l'une des 4 cases suivantes Demande de brevet <input checked="" type="checkbox"/> Demande de certificat d'utilité <input type="checkbox"/> Demande divisionnaire <input type="checkbox"/> Demande de brevet initiale N° _____ Date _____ ou demande de certificat d'utilité initiale N° _____ Date _____ Transformation d'une demande de brevet européen Demande de brevet initiale N° _____ Date _____	
3 TITRE DE L'INVENTION (200 caractères ou espaces maximum) «Dispositif et procédé pour mesurer le contraste des franges dans un interféromètre de Michelson, et système d'examen de l'œil incluant un tel dispositif»			
4 DÉCLARATION DE PRIORITÉ OU REQUÊTE DU BÉNÉFICE DE LA DATE DE DÉPÔT D'UNE DEMANDE ANTÉRIEURE FRANÇAISE		Pays ou organisation Date _____ N° _____ Pays ou organisation Date _____ N° _____ Pays ou organisation Date _____ N° _____ <input type="checkbox"/> S'il y a d'autres priorités, cochez la case et utilisez l'imprimé «Suite»	
5 DEMANDEUR (Cochez l'une des 2 cases) Nom ou dénomination sociale Prénoms Forme juridique N° SIREN Code APE-NAF		<input checked="" type="checkbox"/> Personne morale <input type="checkbox"/> Personne physique Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS) Etablissement public à caractère scientifique et technologique _____ _____ 3 rue Michel Ange [7 5 7 9 4] PARIS CEDEX 16 FRANCE Française N° de téléphone (facultatif) _____ N° de télécopie (facultatif) _____ Adresse électronique (facultatif) _____	
Domicile ou siège Rue Code postal et ville Pays		3 rue Michel Ange [7 5 7 9 4] PARIS CEDEX 16 FRANCE	
Nationalité N° de téléphone (facultatif) Adresse électronique (facultatif)		Française _____ _____	
<input checked="" type="checkbox"/> S'il y a plus d'un demandeur, cochez la case et utilisez l'imprimé «Suite»			

Remplir impérativement la 2^{ème} page



BREVET D'INVENTION CERTIFICAT D'UTILITÉ

REQUÊTE EN DÉLIVRANCE
page 2/2

BR2

REMISE DES PIÈCES DATE 22 JAN 2004 LIEU 75 INPI PARIS 34 SP N° D'ENREGISTREMENT 0400580 NATIONAL ATTRIBUÉ PAR L'INPI		Réservé à l'INPI	
6 MANDATAIRE (s'il y a lieu) Nom Prénom Cabinet ou Société N° de pouvoir permanent et/ou de lien contractuel		PONTET ALLANO & Associés Selarl	
Adresse	Rue	25 rue Jean Rostand Parc Club Orsay Université	
	Code postal et ville	91180 ORSAY	
	Pays	FRANCE	
N° de téléphone (facultatif)		01 69 33 21 21	
N° de télécopie (facultatif)		01 69 41 95 88	
Adresse électronique (facultatif)			
7 INVENTEUR (S) Les demandeurs et les inventeurs sont les mêmes personnes		Les inventeurs sont nécessairement des personnes physiques <input type="checkbox"/> Oui <input checked="" type="checkbox"/> Non : Dans ce cas remplir le formulaire de Désignation d'Inventeur(s)	
8 RAPPORT DE RECHERCHE Établissement immédiat ou établissement différé		Uniquement pour une demande de brevet (y compris division et transformation) <input checked="" type="checkbox"/>	
Paiement échelonné de la redevance (en deux versements)		Uniquement pour les personnes physiques effectuant elles-mêmes leur propre dépôt <input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non	
9 RÉDUCTION DU TAUX DES REDEVANCES		Uniquement pour les personnes physiques <input type="checkbox"/> Requête pour la première fois pour cette invention (joindre un avis de non-imposition) <input type="checkbox"/> Obtenue antérieurement à ce dépôt pour cette invention (joindre une copie de la décision d'admission à l'assistance gratuite ou indiquer sa référence) : AG	
10 SÉQUENCES DE NUCLEOTIDES ET/OU D'ACIDES AMINÉS		<input type="checkbox"/> Cochez la case si la description contient une liste de séquences	
Le support électronique de données est joint La déclaration de conformité de la liste de séquences sur support papier avec le support électronique de données est jointe		<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	
Si vous avez utilisé l'imprimé «Suite», indiquez le nombre de pages jointes			
11 SIGNATURE DU DEMANDEUR OU DU MANDATAIRE (Nom et qualité du signataire) Sylvain ALLANO CPI 96 03 03		VISA DE LA PRÉFECTURE OU DE L'INPI IFBS04 CNR MES	

La loi n°78-17 du 6 janvier 1978 relative à l'informatique, aux fichiers et aux libertés s'applique aux réponses faites à ce formulaire. Elle garantit un droit d'accès et de rectification pour les données vous concernant auprès de l'INPI.



26 bis, rue de Saint Pétersbourg
75800 Paris Cedex 08
Téléphone : 33 (1) 53 04 53 04 Télécopie : 33 (1) 42 94 86 54

BREVET D'INVENTION CERTIFICAT D'UTILITÉ

Code de la propriété intellectuelle - Livre VI



N° 11354*03

REQUÊTE EN DÉLIVRANCE

Page suite N° 1.../1...

BR/SUITE

REMISE DES PIÈCES DATE 22 JAN 2004 LIEU 75 INPI PARIS 34 SP N° D'ENREGISTREMENT 0400580 NATIONAL ATTRIBUÉ PAR L'INPI		Réservé à l'INPI Cet imprimé est à remplir lisiblement à l'encre noire	
Vos références pour ce dossier (facultatif)		IFBS04 CNR MES	
<input checked="" type="checkbox"/> DÉCLARATION DE PRIORITÉ OU REQUÊTE DU BÉNÉFICE DE LA DATE DE DÉPÔT D'UNE DEMANDE ANTÉRIEURE FRANÇAISE		Pays ou organisation _____ N° _____ Date _____ Pays ou organisation _____ N° _____ Date _____ Pays ou organisation _____ N° _____	
<input checked="" type="checkbox"/> DEMANDEUR (Cochez l'une des 2 cases)		<input checked="" type="checkbox"/> Personne morale <input type="checkbox"/> Personne physique	
Nom ou dénomination sociale		OBSERVATOIRE DE PARIS	
Prénoms			
Forme juridique		Etablissement à caractère scientifique, culturel et professionnel	
N° SIREN		_____	
Code APE-NAF		_____	
Domicile ou siège	Rue	61 avenue de l'Observatoire	
	Code postal et ville	[7 5 0 1 1 4] PARIS	
	Pays	FRANCE	
Nationalité		Française	
N° de téléphone (facultatif)			
N° de télécopie (facultatif)			
Adresse électronique (facultatif)			
<input checked="" type="checkbox"/> DEMANDEUR (Cochez l'une des 2 cases)		<input checked="" type="checkbox"/> Personne morale <input type="checkbox"/> Personne physique	
Nom ou dénomination sociale		MAUNA KEA TECHNOLOGIES	
Prénoms			
Forme juridique		Société par actions simplifiée	
N° SIREN		_____	
Code APE-NAF		_____	
Domicile ou siège	Rue	9 rue d'Enghien	
	Code postal et ville	[7 5 0 1 1 0] PARIS	
	Pays	FRANCE	
Nationalité		Française	
N° de téléphone (facultatif)			
N° de télécopie (facultatif)			
Adresse électronique (facultatif)			
<input checked="" type="checkbox"/> SIGNATURE DU DEMANDEUR OU DU MANDATAIRE (Nom et qualité du signataire)		VISA DE LA PRÉFECTURE OU DE L'INPI	
Sylvain ALLANO CPI 96 03 03 			

La loi n°78-17 du 6 janvier 1978 relative à l'informatique, aux fichiers et aux libertés s'applique aux réponses faites à ce formulaire.
Elle garantit un droit d'accès et de rectification pour les données vous concernant auprès de l'INPI

«Dispositif et procédé pour mesurer le contraste des franges dans un interféromètre de Michelson, et système d'examen de l'œil incluant un tel dispositif»

La présente invention concerne un dispositif pour mesurer le contraste des franges
5 dans un interféromètre de Michelson opérant en plein champ. Elle vise également un
procédé mis en œuvre dans ce dispositif, ainsi qu'un système d'examen de l'œil incluant
un tel dispositif.

L'interférométrie de Michelson plein champ est une technique interférométrique
dérivée du montage de Michelson classique qui permet entre autres de déduire les profils
10 de surface et de réflectance d'un échantillon à partir des interférences réalisées entre la
lumière réfléchie par l'échantillon et celle en provenance d'un bras de référence.

Lorsqu'elle est mise en œuvre avec une source de lumière temporellement
faiblement cohérente, cette technique présente dans les milieux transparents et faiblement
diffusants une capacité tomographique. Il s'agit alors de tomographie optique cohérente
15 (OCT) plein champ. La figure 1 illustre ainsi la structure d'un système de tomographie
OCT par interférométrie plein champ représentatif de l'art antérieur.

Pour l'étude de milieux éventuellement biréfringents, d'une part, mais également
dans le souci de collecter le maximum de lumière en retour de l'échantillon, l'OCT plein
champ a souvent été utilisée en lumière polarisée. Dans ce cas, les deux bras de
20 l'interféromètre de Michelson fonctionnent avec des polarisations perpendiculaires. Les
interférences ne sont réalisées sur le bras de sortie qu'après projection sur un axe
commun par l'emploi d'un analyseur à 45 degrés.

La modulation interférométrique, jusqu'à présent nécessaire à la détection
d'interférences de faible amplitude, est réalisée soit en déplaçant le miroir mobile du bras
25 de référence, soit en modulant le chemin optique d'une des polarisations sur le bras de
sortie de l'interféromètre, par exemple, par l'emploi avant l'analyse à 45 degrés, d'un
modulateur photo-élastique. Les mesures d'amplitude d'interférogrammes dans des
conditions médiocres de rapport signal/bruit amènent souvent à considérer des techniques
de modulation de la différence de marche interférométrique couplées à des techniques de
30 détection synchrone.

L'état de phase des interférogrammes obtenus va être temporellement modifié de
manière à pouvoir éliminer la composante continue éventuellement variable du signal
mesuré, qui résulte de la combinaison incohérente des signaux de sortie, due soit à des

réflexions parasites, soit à des réflexions avec des différences de marche supérieures à la longueur de cohérence du rayonnement utilisé.

Quand la stabilité mécanique, donc interférométrique, de l'ensemble du système impose des fréquences de modulation élevées, il arrive que la chaîne de détection, le plus souvent un capteur CCD dans le cas du plein champ, ne puisse opérer convenablement. En général, celle-ci devient le facteur limitant de la fréquence de modulation/détection donc de la capacité du système à observer des franges.

Lors de l'analyse d'un interférogramme de Michelson, au moins trois mesures de l'interférogramme à des états de phase différents sont nécessaires pour déduire sans ambiguïté l'amplitude et la phase de l'interférogramme. Pour des raisons pratiques, on opte le plus souvent pour quatre mesures indépendantes obtenues pour des différences de marche séparées d'un quart de longueur d'onde. C'est donc quatre mesures qu'il est nécessaire de réaliser dans le temps caractéristique où le système d'interférences peut être considéré comme stable. Cette exigence rend d'autant plus délicate la mise en œuvre d'une détection synchrone.

Quand la stabilité temporelle de l'interférogramme fait défaut, ou que la chaîne de détection ne peut atteindre les fréquences requises, la mesure devient difficile, voire impossible.

En sortie d'un interféromètre de Michelson, on utilise habituellement un polariseur à 45 degrés des directions de polarisation incidentes, sur la direction duquel les champs issus des deux bras de l'interféromètre sont projetés. Apparaissent alors les interférences. Lors de cette projection, la moitié de l'énergie entrante est perdue, ce qui contribue à dégrader les performances de l'interféromètre.

Le but de la présente invention est de remédier à cet inconvénient en proposant un dispositif pour mesurer le contraste des franges dans un interféromètre de Michelson, permettant une obtention simultanée d'interférogrammes dans différents états de phase, ce qui donne accès à une mesure de leur amplitude et même de leur phase en dépit d'éventuelles instabilités. Cette invention s'applique au cas d'interférogrammes plein champ en lumière polarisée.

Cet objectif est atteint avec un dispositif de mesure de contraste comprenant des moyens pour dévier deux polarisations perpendiculaires entrantes dans deux directions émergentes différentes, ces moyens de déviation étant disposés au sein de l'interféromètre en substitution du polariseur unique.

La lumière perdue est la projection des champs sur une direction perpendiculaire à la direction du polariseur. Or sur cette direction, on pourrait observer aussi des interférences. Remplacer le polariseur unique par un prisme de Wollaston permet d'utiliser les deux sorties comme les sorties de deux polariseurs perpendiculaires qui
5 seraient utilisés simultanément. L'intégralité de la lumière entrante est ainsi utilisée.

Les moyens de déviation peuvent être avantageusement réalisés sous la forme d'un prisme de Wollaston, dont les axes sont orientés à 45 degrés des polarisations des bras. Ce prisme est un dispositif commercial courant qui est habituellement utilisé pour
10 séparer angulairement des radiations polarisées linéairement. L'angle de séparation est une caractéristique du prisme de Wollaston et peut être choisie dans une large gamme.

Le montage d'un prisme de Wollaston en sortie d'un interféromètre de Michelson plein champ permet ainsi de réaliser plusieurs simultanées des interférogrammes à des états de phase différents. Il rend particulièrement simple et robuste l'extraction des informations d'amplitude et de phase des rayonnements issus de l'interféromètre. Le
15 dispositif selon l'invention s'applique particulièrement bien au cas de la tomographie par OCT plein champ sur des échantillons mécaniquement instables à une échelle interférométrique.

Lorsque l'interféromètre de Michelson est mis en œuvre dans un système de tomographie OCT, l'extraction du contraste interférométrique des données se fait,
20 compte tenu de la très faible valeur de ce contraste, par l'emploi de techniques de modulation associées à des méthodes de détection synchrone. Deux à quatre mesures, selon le cas, obtenues pour des différences de marche différant de $\lambda/2$ ou $\lambda/4$ le cas échéant, sont ainsi réalisées. Ces mesures sont, par le principe même de la modulation, obtenues à des dates différentes. Garantir la cohérence de ces mesures impose de pouvoir
25 garantir l'invariance de la différence de marche (hors la modulation recherchée) constante. A $\lambda = 780$ nm, pour une fréquence d'échantillonnage de 100hz, par exemple, garantir la différence de marche à $\lambda/4$ près, s'exprime en imposant une variation de la différence de marche inférieure à $V=100*\lambda/4=2\mu\text{m/sec}$. Une telle contrainte rend toute mesure *in vivo* quasi impossible.

30 Un second objectif de la présente invention est de résoudre ce problème relatif à la variabilité de la différence de marche. Cet objectif est atteint avec l'emploi d'un prisme de Wollaston qui permet d'obtenir au moins deux mesures strictement

simultanées et en opposition de phase. En effet, si la première projection mène à la quantité :

$$I_a = I_1 + I_2 + 2 \cdot (I_1 \cdot I_2) \cdot \cos(\varphi) \quad (I)$$

où φ est le déphasage relative des deux voies,

5 alors la seconde projection conduit à :

$$I_a = I_1 + I_2 - 2 \cdot (I_1 \cdot I_2) \cdot \cos(\varphi) \quad (II)$$

Ce qui s'écrit aussi:

$$I_b = I_1 + I_2 + 2 \cdot (I_1 \cdot I_2) \cdot \cos(\varphi + \pi) \quad (III)$$

On dispose donc bien simultanément de deux réalisations du système
10 d'interférence à deux différences de marche séparées de $\lambda/2$.

Un autre problème rencontré dans un interféromètre de Michelson concerne la disponibilité de quatre mesures par modulation. En effet, l'obtention de quatre mesures pose encore plus de problèmes que l'obtention de deux mesures par modulation, toujours pour des raisons de variabilité de la différence de marche.

15 Ce problème de disponibilité de quatre mesures est résolu en séparant en deux le faisceau par une lame séparatrice simple non polarisante. Dans l'un des deux faisceaux produits, un retard supplémentaire de $\lambda/4$ est imposé entre les polarisations issues des deux bras de l'interféromètre. Une lame quart d'onde permet d'imposer ce retard. Les deux faisceaux ainsi conditionnés sont ensuite réintroduits ensemble et avec un petit
20 angle, dans le prisme de Wollaston de telle sorte qu'en sortie de ce dernier, on dispose alors de quatre faisceaux avec les intensités suivantes :

$$I_a = I_1 + I_2 + 2 \cdot (I_1 \cdot I_2) \cdot \cos(\varphi) \quad (IV)$$

$$I_a = I_1 + I_2 + 2 \cdot (I_1 \cdot I_2) \cdot \cos(\varphi + \pi/2)$$

$$I_a = I_1 + I_2 + 2 \cdot (I_1 \cdot I_2) \cdot \cos(\varphi + \pi)$$

25 $I_a = I_1 + I_2 + 2 \cdot (I_1 \cdot I_2) \cdot \cos(\varphi + 3\pi/2)$

Les interférogrammes doivent être consistants, c'est à dire que le déphasage impose $(0, \pi/2, \pi, 3 \pi/2)$ doit être constant dans le champ.

A cette fin le prisme de Wollaston est utilisé dans un plan pupille. Tous les points du champ voient ainsi la même portion du prisme, ce qui garantit la condition fixée de
30 constante du déphasage dans le champ.

Il est à noter que les équations (IV) précitées ne sont valables que si l'angle de direction des polarisations est rigoureusement égal à 45 degrés. Pour atteindre cet objectif, on dispose une lame demi-onde précédant le prisme de Wollaston. Cette lame

5 demi-onde permet d'orienter arbitrairement, mais ensemble, les polarisations des quatre faisceaux incidents par rapport aux axes propres du prisme de Wollaston. Le prisme de Wollaston est ainsi précisément aligné par rapport au détecteur, par exemple selon la direction de séparation parallèle aux lignes du détecteur, sans hypothèse sur l'alignement précis des polarisations incidentes par rapport à lui. La lame demi-onde joue un rôle d'interface entre le montage en amont du prisme de Wollaston et le montage en aval.

10 Les fréquences de modulation souhaitées sont généralement assez élevées, ce qui impose des temps de pose et de lecture assez courts. Ce problème de cadence image et de temps de pose est résolu avec une simultanéité des mesures qui supprime alors toute nécessité de rapidité pour le détecteur. La brièveté de la pose, le cas échéant, peut être assurée par la brièveté de l'éclairement, par exemple un flash, sans que ni l'intégration du détecteur, ni sa lecture, ne soient brèves ou rapides.

Suivant un autre aspect de l'invention, il est proposé un système d'examen de l'œil par tomographie *in vivo*, comprenant :

- 15 - un interféromètre de Michelson, réalisant un montage d'OCT plein champ,
- des moyens d'optique adaptative, disposés entre l'interféromètre et un œil à examiner, réalisant la correction des fronts d'onde en provenance de l'œil mais aussi à destination de l'œil, et
- des moyens de détection, disposé en aval de l'interféromètre, permettant sans
20 modulation ni détection synchrone, de réaliser la mesure interférométrique selon le principe de l'OCT,
caractérisé en ce qu'il comprend en outre un dispositif pour mesurer le contraste des franges dans un interféromètre de Michelson en plein champ, ce dispositif comprenant des moyens pour dévier deux polarisations perpendiculaires entrantes dans deux
25 directions émergentes différentes.

Ce système d'examen selon l'invention peut en outre avantageusement comprendre un dispositif de visée comprenant au moins une cible mobile présentant une forme et une trajectoire programmable, cette au moins une cible étant affichée sur un écran approprié, visible des deux yeux, pendant la durée de l'examen.

30 D'autres avantages et caractéristiques de l'invention apparaîtront à l'examen de la description détaillée d'un mode de mise en œuvre nullement limitatif, et des dessins annexés sur lesquels :

- la figure 1 est un schéma synoptique d'un système de tomographie OCT plein champ représentatif de l'art antérieur ;
- la figure 2 illustre le principe d'un prisme de Wollaston mis en œuvre dans un dispositif d'amélioration selon l'invention ;
- 5 - la figure 3 illustre schématiquement une première configuration, de mesure en deux phase, d'un dispositif d'amélioration de contraste selon l'invention,
- la figure 4 illustre schématiquement une seconde configuration, de mesure en quatre phase, d'un dispositif d'amélioration de contraste selon l'invention ; et
- la figure 5 illustre schématiquement un exemple pratique de réalisation d'un système de tomographie *in vivo* intégrant un dispositif d'amélioration de contraste selon l'invention.

On va maintenant tout d'abord décrire, en référence aux figures 2 et 3, le principe de la mesure en deux phases mis en œuvre dans le dispositif selon l'invention.

Si l'on nomme a_1 (resp. a_2), l'amplitude du champ électrique en provenance du bras de référence (resp. mesure) de l'interféromètre de Michelson, la projection sur l'un des axes du prisme de Wollaston a pour amplitude :

$$A_v = 2/2(a_1 + a_2)$$

tandis que la projection sur l'autre axe du prisme de Wollaston aura pour amplitude :

$$20 \quad A_h = 2/2(a_1 - a_2)$$

Les deux projections sont séparées angulairement de l'angle caractéristique du prisme de Wollaston. Focalisées par l'objectif de chambre, elles produisent deux images interférométriques du champ juxtaposées, dont les énergies ont pour expression :

$$25 \quad I_v = |A_v|^2 \text{ et } I_h = |A_h|^2$$

soit

$$I_v = 1/2(a_1^2 + a_2^2 + 2a_1.a_2.\cos(\varphi))$$

et

$$I_h = 1/2(a_1^2 + a_2^2 - 2a_1.a_2.\cos(\varphi))$$

30 où φ est la différence de phase entre les deux rayonnements a_1 et a_2 .

La seconde égalité peut aussi s'écrire :

$$I_h = 1/2(a_1^2 + a_2^2 + 2a_1.a_2.\cos(\varphi + \pi))$$

Ainsi, on obtient simultanément deux images correspondent à deux états de l'interférogramme en opposition de phase. La durée de la pose (ou de l'illumination de l'échantillon) peut être rendue arbitrairement courte, dans la limite de la détection, pour garantir le « gel » de l'information interférométrique. Néanmoins, la simultanéité des
 5 deux mesures, donc le déphasage de π , n'est jamais remise en cause. Il faut également noter que ce déphasage est obtenu mathématiquement, par construction, et est totalement achromatique.

En réalité, la quantité a_2 doit être vue comme la superposition d'un rayonnement d'amplitude a_{20} qui n'interfère pas avec a_1 faute d'une différence de marche
 10 suffisamment petite, et d'un rayonnement d'amplitude a_{2*} réfléchi avec une différence de marche inférieure à la longueur de cohérence de la source utilisée, qui lui, interfère. On a donc :

$$I_v = 1/2(a_1^2 + a_2^2 + 2a_1 \cdot a_{2*} \cdot \cos(\varphi))$$

$$I_h = 1/2(a_1^2 + a_2^2 + 2a_1 \cdot a_{2*} \cdot \cos(\varphi + \pi))$$

15 De la différence entre I_h et I_v , on tire la quantité réellement module:

$$I_m = 2a_1 \cdot a_{2*} \cdot \cos(\varphi)$$

C'est cette même quantité que l'on obtient par détection synchrone, mais alors au prix d'une dichotomie temporelle de la mesure, puisque la moitié du temps de pose doit être consacrée à chaque mesure, à φ et $\varphi + \pi$.

20 Outre la simultanéité, cette méthode offre donc un avantage photométrique qui trouve son origine dans le fait que les deux projections possibles à 45 degrés sont traitées. Toute l'énergie disponible est utilisée. Toutefois, la quantité I_m ne sépare pas a_{2*} de φ , en considérant a_1 connu. Il reste une ambiguïté entre l'amplitude et le cosinus de la phase.

25 Dans une seconde configuration du dispositif selon l'invention illustrée par la figure 4, on effectue une mesure selon quatre phases. On prélève avant le prisme de Wollaston 50% de l'énergie via une lame semi-réfléchissante. Sur le faisceau dévié, où l'on trouve les rayonnements des deux bras encore polarisés perpendiculairement, on installe une lame quart d'onde dont les axes sont alignés avec les deux polarisations
 30 incidentes. On impose ainsi un déphasage supplémentaire de $\pi/2$ entre les deux bras.

Il suffit alors d'injecter le faisceau dans le même prisme de Wollaston, mais avec un petit angle par rapport au faisceau non dévié, qui peut d'ailleurs être choisi égal à l'angle caractéristique du prisme de Wollaston, pour obtenir en sortie quatre faisceaux

angulairement séparés. Pour des raisons pratiques, on peut faire précéder l'ensemble d'une lame demi-onde dont la fonction est de préparer l'orientation de toutes les polarisations.

Les amplitudes du champ dans les quatre faisceaux sont :

$$\begin{aligned} 5 \quad A_A &= 1/2(a_1 + a_2) \\ A_B &= 1/2(a_1 - a_2) \\ A_C &= 1/2(a_1 + a_2[\pi/2]) \\ A_D &= 1/2(a_1 - a_2[\pi/2]) \end{aligned}$$

où $a_2[\pi/2]$ représente l'amplitude du rayonnement a_2 déphasé de $\pi/2$.

10 A ces quatre amplitudes correspondent quatre intensités mesurées :

$$\begin{aligned} I_A &= 1/4(a_1^2 + a_2^2 + 2a_1 \cdot a_2 \cdot \cos(\varphi)) \\ I_B &= 1/4(a_1^2 + a_2^2 - 2a_1 \cdot a_2 \cdot \cos(\varphi)) \\ I_C &= 1/4(a_1^2 + a_2^2 + 2a_1 \cdot a_2 \cdot \cos(\varphi + \pi/2)) \\ I_D &= 1/4(a_1^2 + a_2^2 - 2a_1 \cdot a_2 \cdot \cos(\varphi + \pi/2)) \end{aligned}$$

15

Soit encore:

$$\begin{aligned} I_A &= 1/4(a_1^2 + a_2^2 + 2a_1 \cdot a_2 \cdot \cos(\varphi)) \\ I_B &= 1/4(a_1^2 + a_2^2 - 2a_1 \cdot a_2 \cdot \cos(\varphi)) \\ I_C &= 1/4(a_1^2 + a_2^2 + 2a_1 \cdot a_2 \cdot \cos(\varphi + \pi/2)) \\ 20 \quad I_D &= 1/4(a_1^2 + a_2^2 - 2a_1 \cdot a_2 \cdot \cos(\varphi + \pi/2)) \end{aligned}$$

On a bien cette fois quatre images interférométriques simultanées du champ, correspondent à quatre états de phases différents de l'interférogramme, desquelles on peut tirer classiquement les deux quantités :

$$\begin{aligned} 25 \quad Im_1 &= I_A - I_B = a_1 \cdot a_2 \cdot \cos(\varphi) \\ Im_2 &= I_C - I_D = a_1 \cdot a_2 \cdot \cos(\varphi + \pi/2) = a_1 \cdot a_2 \cdot \sin(\varphi) \end{aligned}$$

Ce qui permet d'éliminer la phase par somme des carrés:

$$I = Im_1^2 + Im_2^2 = a_1^2 \cdot a_2^2 = I_1 \cdot I_2$$

où I_1 et I_2 sont les intensités retournées par le bras de référence de
30 l'interféromètre de Michelson et l'échantillon, à la profondeur sélectionnée par la longueur du bras de référence. Du rapport de Im_1 et Im_2 , on peut tirer $\tan(\varphi)$ indépendamment de I_2 .

Si l'emploi d'un prisme de Wollaston donne accès à des mesures simultanées de l'interférogramme à des états de phase différents, ces mesures sont néanmoins réalisées avec des détecteurs ou des pixels du capteur CCD différents. Un étalonnage soigné de la sensibilité et du biais propre de chaque pixel doit donc être effectué pour écarter toute
5 possibilité de biais dans le calcul des différences Im_1 et Im_2 et donc de la somme de leur carré.

On va maintenant décrire, en référence à la figure 5, un exemple pratique de réalisation d'un système de tomographie *in vivo* selon l'invention intégrant un dispositif de mesure de contraste interférométrique. Ce système comprend un interféromètre, de
10 type Michelson plein champ, comportant un bras de mesure prévu pour illuminer l'œil et collecter la lumière renvoyée, et un bras de référence prévu pour illuminer un miroir mobile permettant l'exploration en profondeur du tissu rétinien.

L'interféromètre est utilisé en lumière polarisée de façon rectiligne et perpendiculaire dans les deux bras. La source de lumière S est une diode à faible
15 longueur de cohérence temporelle (par exemple, 12 μm), dont le spectre est centré sur 780 nm. Elle confère par principe au système de tomographie *in vivo* une résolution axiale égale à la moitié de la longueur de cohérence divisée par l'indice de réfraction du milieu.

Cette source de lumière S peut être pulsée. Dans ce cas, elle est alors
20 synchronisée avec la prise d'image et la correction adaptative. Le faisceau est limité par un diaphragme de champ correspondant à 1 degré dans le champ de vue de l'œil (300 μm sur la rétine) et un diaphragme pupillaire correspondant à une ouverture de 7 mm sur un œil dilaté.

Un polariseur d'entrée P permet l'équilibrage optimal des flux injectés dans les
25 deux bras de l'interféromètre.

Les deux bras présentent une configuration dite de Gauss, afocale, qui permet le transport des pupilles, d'une part, et la matérialisation d'une image intermédiaire du champ où un diaphragme bloque une grande part du reflet cornéen, d'autre part. Des
30 lames quart d'onde assurent par la rotation de la polarisation de la seule lumière renvoyée par l'œil, et le miroir mobile, un filtrage efficace des réflexions parasites dans le système de tomographie *in vivo* selon l'invention.

Afin de conserver l'égalité des chemins optiques dans les deux bras, avec le même transport des pupilles et du champ, le bras de référence est similaire au bras de mesure, mais avec un optique statique.

On va maintenant décrire la voie de détection du système de tomographie *in vivo* selon l'invention. Les deux faisceaux sur le bras de sortie sont encore polarisés perpendiculairement, et ils n'interfèrent que s'ils sont projetés sur une direction commune. Un prisme de Wollaston W a pour fonction de projeter simultanément les deux rayonnements sur deux directions d'analyse perpendiculaires. On peut alors effectuer une mesure simultanée de l'intensité après interférence dans deux états d'interférence en opposition, sans modulation ni détection synchrone, sur un détecteur bidimensionnel unique. L'adjonction d'une lame quart d'onde, après division du faisceau, permet d'accéder à deux mesures supplémentaires, levant ainsi toute ambiguïté entre amplitude et phase des franges. Une lame demi onde à l'entrée de la voie de détection permet d'orienter convenablement les polarisations incidentes.

Le prisme de Wollaston est placé dans un plan pupillaire, donc conjugué du cube séparateur de l'interféromètre de Michelson. L'angle de séparation du prisme de Wollaston est choisi en fonction du champ à observer. La longueur focale de l'objectif final détermine le pas d'échantillonnage des quatre images.

Le détecteur est du type CCD, avec une cadence d'image est supérieure à 30 images par seconde. Ce détecteur est associé à un ordinateur dédié (non représenté) dans lequel est réalisé le traitement numérique des images : extraction des quatre mesures, étalonnage, calcul de l'amplitude des franges.

La correction adaptative des fronts d'onde est réalisée en amont de l'interféromètre, donc dans le bras de mesure. Chaque point de la source S voit ainsi son image sur la rétine corrigée des aberrations, et l'image en retour est également corrigée. L'amplitude des franges est alors maximale.

Le sous-ensemble d'optique adaptative comprend un miroir déformable MD. La mesure de front d'onde est faite par un analyseur SH de type Shack-Hartmann sur le faisceau de retour d'un spot lumineux lui-même imagé sur la rétine via le miroir déformable MD. La longueur d'onde d'analyse est de 820 nm. L'éclairage est continu et fourni par une diode SLD superluminescente temporellement incohérente. Le dimensionnement de l'analyseur correspond à une optimisation entre sensibilité photométrique et échantillonnage du front d'onde. La cadence de rafraîchissement de la

commande du miroir déformable MD peut atteindre 150 Hz. Un calculateur dédié (non représenté) gère la boucle d'optique adaptative. La commande est toutefois synchronisée pour geler la forme du miroir pendant la mesure interférométrique.

5 Un contrôle approprié de la focalisation de la voie d'analyse, au moyen d'une lentille LA2, permet d'adapter la distance de focalisation à la couche sélectionnée par l'interféromètre. Cette disposition est capitale pour conserver un contraste optimal à toute profondeur.

10 Le miroir déformable MD est conjugué de la pupille du système et de l'œil. Le champ du système est défini par le diaphragme de champ DCM d'entrée du système. Il est choisi égal à 1 degré, soit moins que le champ d'isoplanétisme de l'œil, ce qui garantit la validité de la correction adaptative dans le champ sur la seule mesure de front d'onde réalisée à partir du spot, au centre du champ. De plus, la rotation du miroir déformable MD permet de choisir l'angle d'arrivée du faisceau dans l'œil, donc la portion de rétine étudiée.

15 L'adjonction de verres correcteurs de la vue du sujet, donc des bas ordres d'aberrations géométriques tels que le focus ou l'astigmatisme, juste devant l'œil, permet de relâcher les exigences sur la course du miroir déformable MD, et garantit également une meilleure visée. Un système correcteur adaptatif par transmission peut être utilisé de préférence à des verres fixes pour une correction optimale.

20 Un système de visée collaboratif ou actif est installé en amont de l'ensemble. Ce système de visée, qui comprend une mire active MAM, présente au sujet l'image d'un point lumineux s'écartant périodiquement de l'axe de visée recherché. Le patient est alors invité à suivre tous les mouvements de cette image. Chaque fois que l'image revient sur l'axe, et après un temps de latence ajustable, une série de mesures interférométriques est
25 réalisée. Le déplacement périodique du regard permet d'obtenir du patient une meilleure capacité de fixation quand il vise l'axe recherché. L'amplitude et la fréquence sont adaptables au sujet et aux mesures entreprises. Pour des raisons de commodité, la mire peut être réalisée avec un simple ordinateur de bureau sur lequel un point lumineux est affiché et déplacé. La mire active MAM, l'optique adaptative, la source S et la prise
30 d'image sont synchronisées.

Dans l'exemple pratique de réalisation illustré par la figure 5, le système de tomographie in vivo selon l'invention est relativement compact, moins de 1,2 m de côté. Une part importante de la contrainte de taille vient du diamètre du miroir déformable MD

qui fixe en partie la longueur focale des paraboles hors axe. L'emploi de micro-miroirs diminuerait évidemment toutes les dimensions du système.

Le système de détection, avec sa division en deux faisceau, est réalisé ici avec des composants discrets. Il est envisageable de faire réaliser et d'utiliser des composants
5 intégrés réunissant les fonctions de séparation, repliement, voire, retard des faisceaux.

Bien sûr, l'invention n'est pas limitée aux exemples qui viennent d'être décrits et de nombreux aménagements peuvent être apportés à ces exemples sans sortir du cadre de l'invention.

REVENDICATIONS

1. Dispositif pour mesurer le contraste des franges dans un interféromètre de Michelson en plein champ, comprenant des moyens pour dévier deux polarisations perpendiculaires entrantes dans deux directions émergentes différentes, ces moyens de déviation étant
5 disposés au sein de l'interféromètre en substitution du polariseur unique.
2. Dispositif selon la revendication 1, caractérisé en ce que les moyens de déviation comprennent un prisme de Wollaston.
- 10 3. Dispositif selon la revendication 2, appliqué à un interféromètre de Michelson mis en œuvre dans un système de tomographie optique cohérente (OCT).
4. Dispositif selon la revendication 3, caractérisé en ce qu'il est agencé pour réaliser des
15 mesures pour des différences de marche différant de $\lambda/2$ ou $\lambda/4$.
5. Dispositif selon la revendication 4, caractérisé en ce qu'il est agencé pour obtenir au moins deux mesures, strictement simultanées et en opposition de phase.
- 20 6. Dispositif selon l'une des revendications 3 à 5, caractérisé en ce qu'il est agencé pour réaliser quatre mesures, et en ce qu'il comprend en outre des moyens pour séparer en deux le faisceau, des moyens pour générer, dans l'un des deux faisceaux produits, un retard supplémentaire de $\lambda/4$ entre les polarisations issues des deux bras de l'interféromètre, et des moyens pour réintroduire ensemble les deux faisceaux ainsi
25 conditionnés dans les moyens de déviation de telle sorte qu'en sortie de ce dernier, on dispose alors de quatre faisceaux.
7. Dispositif selon la revendication 6, caractérisé en ce que les moyens séparateurs comprennent une lame séparatrice simple non polarisante.
- 30 8. Dispositif selon l'une des revendications 6 ou 7, caractérisé en ce que les moyens retardateurs comprennent une lame quart d'onde.

9. Dispositif selon l'une des revendications 6 à 8, caractérisé en ce que le prisme de Wollaston est disposé dans un plan pupille.
10. Dispositif selon l'une des revendications 6 à 9, caractérisé en ce qu'il comprend en
5 outre des moyens pour orienter arbitrairement les polarisations des quatre faisceaux incidents par rapport aux axes propres du prisme de Wollaston.
11. Dispositif selon la revendication 10, caractérisé en ce que les moyens d'orientation comprennent une lame demi-onde précédant le prisme de Wollaston.
- 10 12. Procédé pour mesurer le contraste des franges dans un interféromètre de Michelson en plein champ, comprenant une déviation de deux polarisations perpendiculaires entrantes dans deux directions émergentes différentes, au moyen d'un prisme de Wollaston.
- 15 13. Procédé selon la revendication 12, mis en œuvre dans un système de tomographie optique cohérente (OCT).
14. Procédé selon la revendication 13, caractérisé en ce qu'il comprend des mesures pour
20 des différences de marche différant de $\lambda/2$ ou $\lambda/4$.
15. Procédé selon la revendication 14, caractérisé en ce qu'il comprend au moins deux mesures strictement simultanées et en opposition de phase.
- 25 16. Procédé selon l'une des revendications 13 à 15, caractérisé en ce qu'il comprend quatre mesures, une séparation en deux du faisceau, une génération, dans l'un des deux faisceaux produits, d'un retard supplémentaire de $\lambda/4$ entre les polarisations issues des deux bras de l'interféromètre, et une réintroduction des deux faisceaux ainsi conditionnés dans les moyens de déviation de telle sorte qu'en sortie de ce dernier, on dispose alors de
30 quatre faisceaux.

17. Procédé selon la revendication 16, caractérisé en ce qu'il comprend en outre une orientation arbitraire des polarisations des quatre faisceaux incidents par rapport aux axes propres du prisme de Wollaston.

5 18. Procédé selon la revendication 17, caractérisé en ce que les mesures sur les quatre faisceaux sont réalisées simultanément.

19. Système d'examen de l'œil par tomographie *in vivo*, comprenant :

- un interféromètre de Michelson, réalisant un montage d'OCT plein champ,
 - 10 - des moyens d'optique adaptative, disposés entre l'interféromètre et un œil à examiner, réalisant la correction des fronts d'onde en provenance de l'œil mais aussi à destination de l'œil, et
 - des moyens de détection, disposé en aval de l'interféromètre, permettant sans modulation ni détection synchrone, de réaliser la mesure interférométrique selon le
 - 15 principe de la tomographie optique cohérente (OCT),
- caractérisé en ce qu'il comprend en outre un dispositif pour mesurer le contraste des franges dans un interféromètre de Michelson en plein champ, ce dispositif comprenant des moyens pour dévier deux polarisations perpendiculaires entrantes dans deux directions émergentes différentes.

20

20. Système d'examen de l'œil selon la revendication 19, caractérisé en ce qu'il comprend en outre un dispositif de visée comprenant au moins une cible mobile présentant une forme et une trajectoire programmable, ladite au moins une cible étant affichée sur un écran approprié, visible des deux yeux, pendant la durée de l'examen.

25

1/2

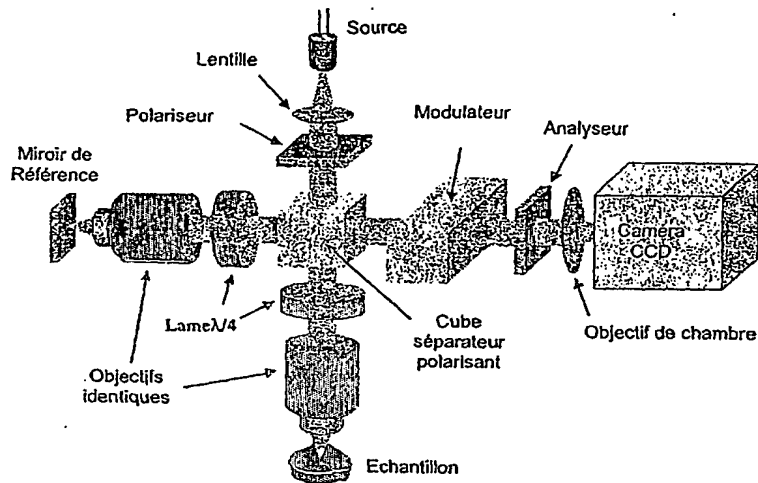


FIG. 1

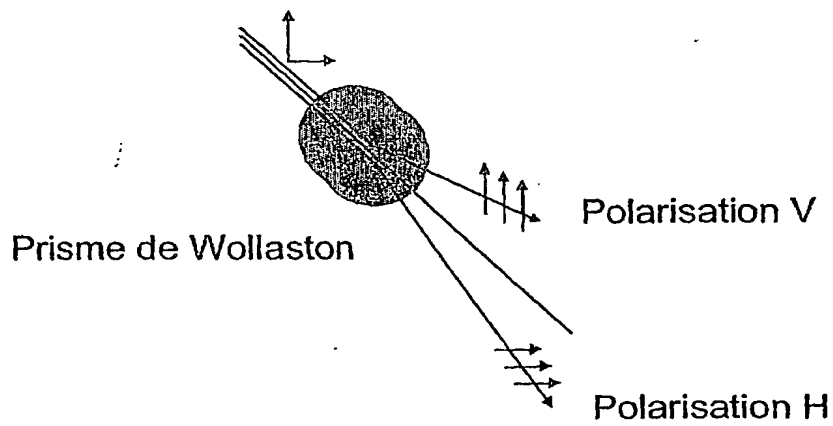


FIG. 2

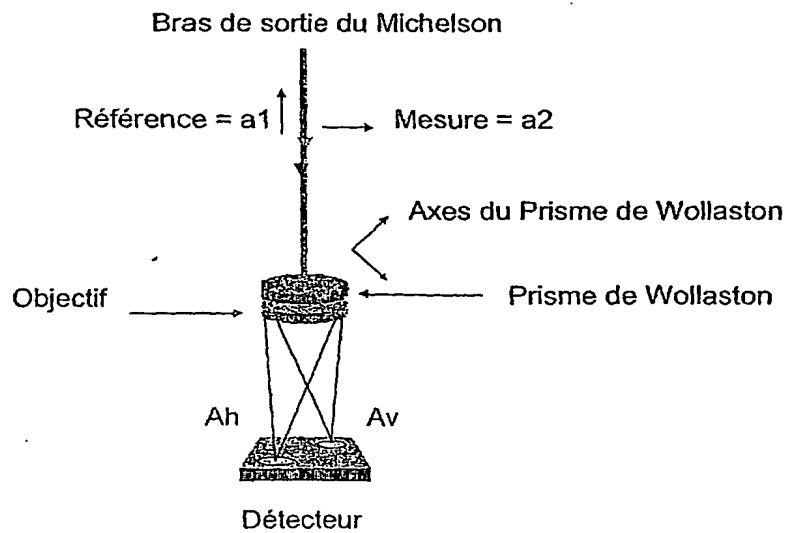


FIG. 3

1 / 2

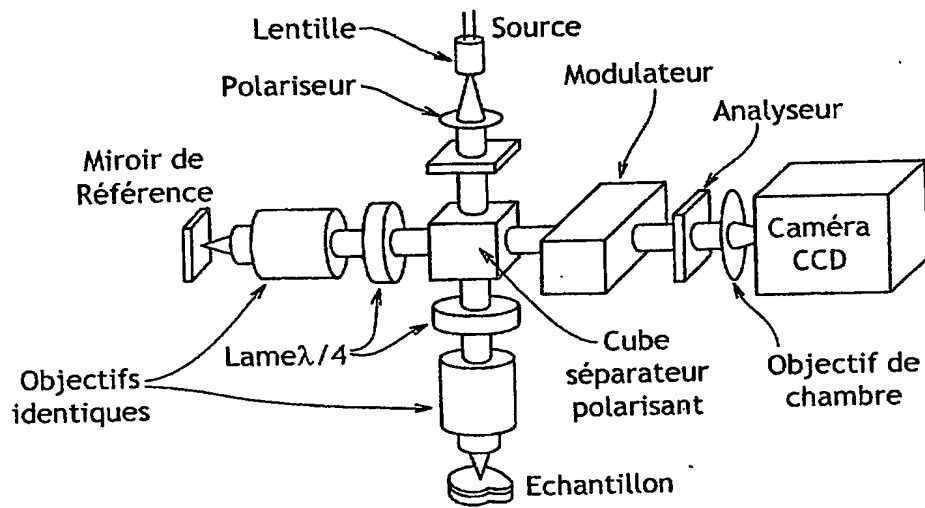


FIG.1

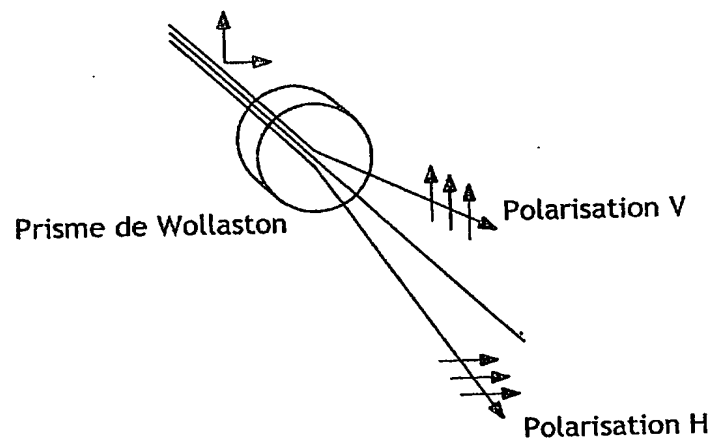


FIG.2

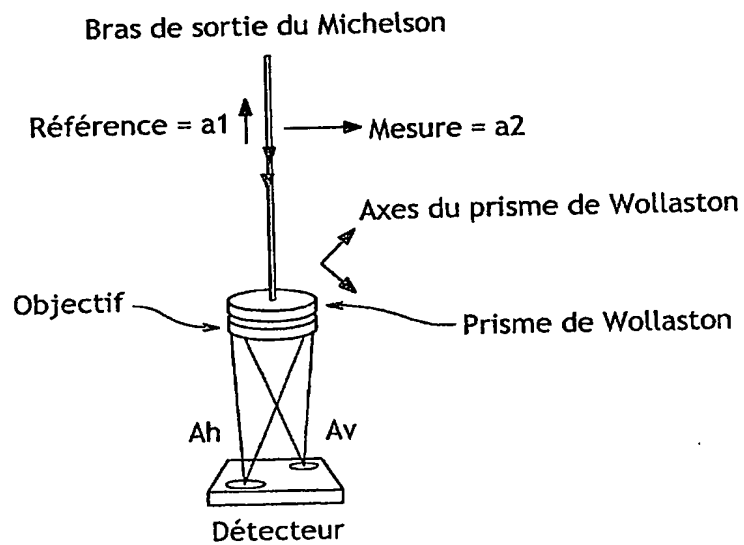


FIG.3

2/2

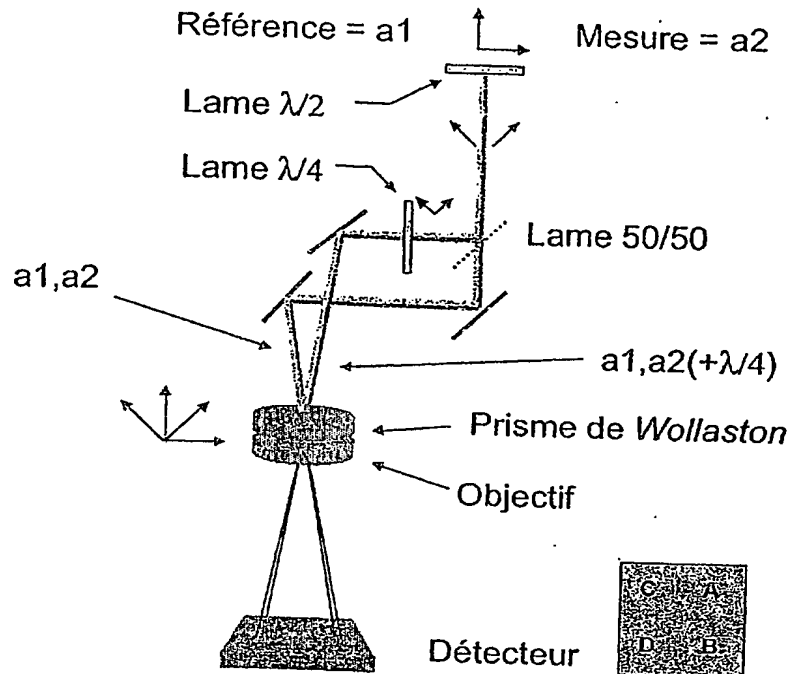


FIG. 4

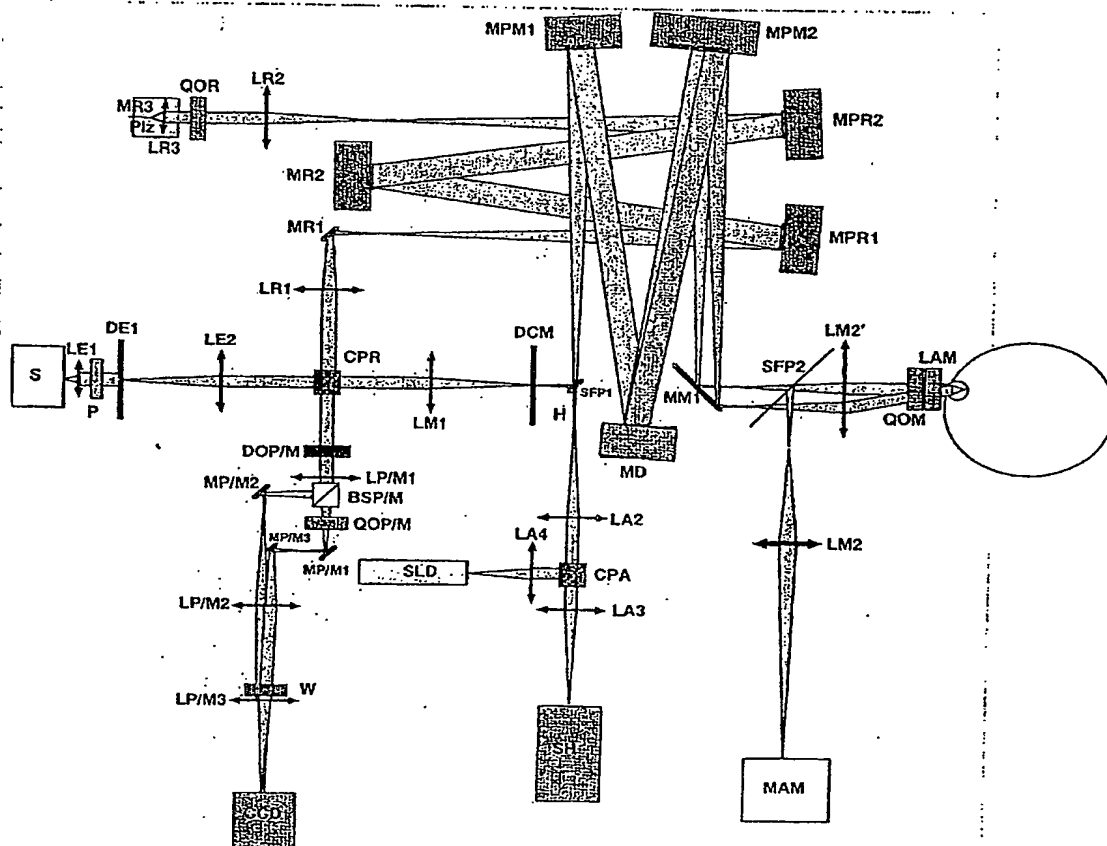


FIG. 5

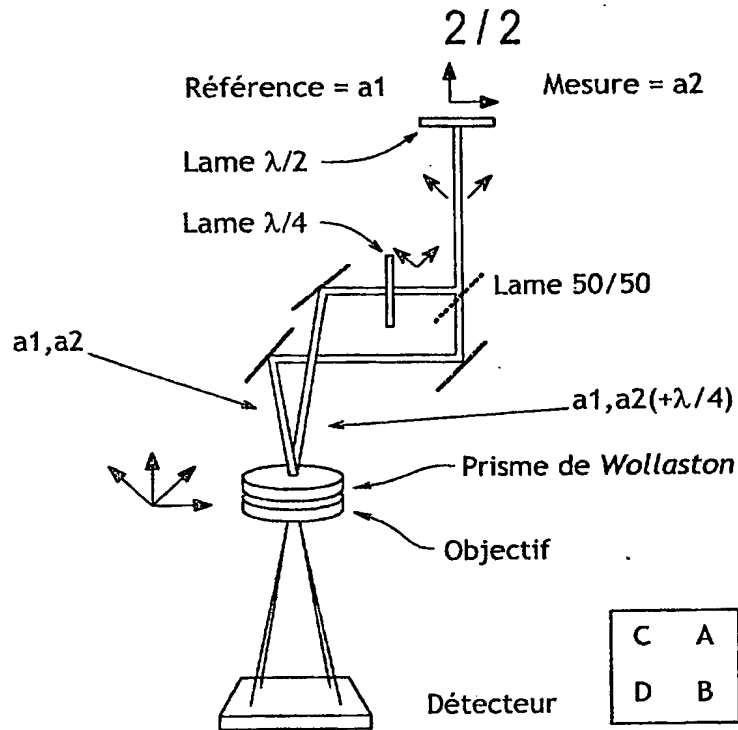


FIG.4

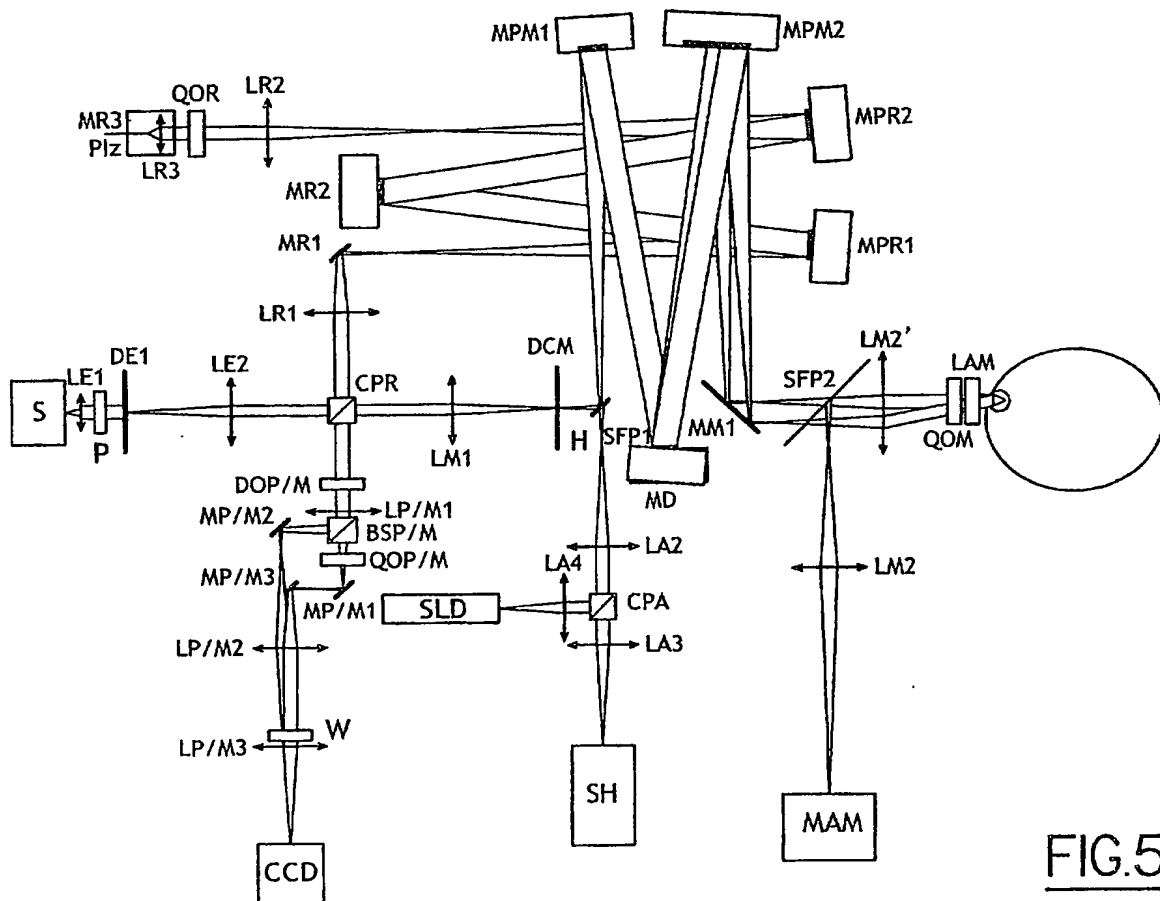


FIG.5



BREVET D'INVENTION
CERTIFICAT D'UTILITÉ
 Code de la propriété intellectuelle - Livre VI

cerfa
 N° 11235*03

DÉPARTEMENT DES BREVETS

26 bis, rue de Saint Pétersbourg
 75800 Paris Cedex 08

Téléphone : 33 (1) 53 04 53 04 Télécopie : 33 (1) 42 94 86 54

DÉSIGNATION D'INVENTEUR(S) Page N° 1../1..

(À fournir dans le cas où les demandeurs et les inventeurs ne sont pas les mêmes personnes)



Cet Imprimé est à remplir lisiblement à l'encre noire

DB 113 0 W / 270501

Vos références pour ce dossier (facultatif)		IFBS04 CNR MES
N° D'ENREGISTREMENT NATIONAL		04 00580
TITRE DE L'INVENTION (200 caractères ou espaces maximum) Dispositif et procédé pour mesurer le contraste des franges dans un interféromètre de Michelson, et système d'examen de l'oeil incluant un tel dispositif		
LE(S) DEMANDEUR(S) : 1) CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE (CNRS) 3 rue Michel Ange, 75794 PARIS CEDEX 16, FRANCE 2) OBSERVATOIRE DE PARIS 61 avenue de l'Observatoire, 75014 PARIS, FRANCE 3) MAUNA KEA TECHNOLOGIES 9 rue d'Enghien, 75010 PARIS, FRANCE		
DESIGNE(NT) EN TANT QU'INVENTEUR(S) :		
<input checked="" type="checkbox"/> 1	Nom	LACOMBE
	Prénoms	François
	Adresse	Rue
		2173, Avenue R. Salengro
		Code postal et ville
		19 213 17 10 CHAVILLE
Société d'appartenance (facultatif)		
<input checked="" type="checkbox"/> 2	Nom	LAFAILLE
	Prénoms	David
	Adresse	Rue
		2, rue du Bel Air
		Code postal et ville
		19 211 19 10 MEUDON
Société d'appartenance (facultatif)		
<input checked="" type="checkbox"/> 3	Nom	
	Prénoms	
	Adresse	Rue
		Code postal et ville
Société d'appartenance (facultatif)		
S'il y a plus de trois inventeurs, utilisez plusieurs formulaires. Indiquez en haut à droite le N° de la page suivi du nombre de pages.		
DATE ET SIGNATURE(S) DU (DES) DEMANDEUR(S) OU DU MANDATAIRE (Nom et qualité du signataire)		
Orsay, le 26 Avril 2004 Sylvain ALLANO 		

La loi n°78-17 du 6 janvier 1978 relative à l'informatique, aux fichiers et aux libertés s'applique aux réponses faites à ce formulaire. Elle garantit un droit d'accès et de rectification pour les données vous concernant auprès de l'INPI.